

氏 名 幸 田 盛 堂

学 位 の 種 類	学術博士
学 位 記 番 号	学博甲第23号
学位授与の日付	平成 2 年 3 月25日
学位授与の要件	博士課程修了 (学位規則第 5 条第 1 項)
学位授与の題目	自動加工システムにおける高精度化対応技術に関する研究
論文審査委員	(主査) 杉 田 忠 彰 (副査) 上 田 完 次 (副査) 尾 田 十 八 (副査) 稲 村 豊四郎 (副査) 上 田 隆 司

学位論文要旨

Study on Techniques for Improving Machining Accuracy in Automated Machining System

By Seido KODA

Summary

With the tendency to automate the machine working line, the improvement of machining accuracy in a machining center (MC), which is considered as a key machine tool in the automated machining system, has become an increasingly important tasks. The loss of accuracy is caused by many factors which are composed of MC accuracy, workpiece-setting errors, tool-setting errors, measuring accuracy of machined parts and the environmental conditions.

This study deals with practical methods of reducing the effects of disturbance factors upon the accuracy of MCs by temperature control, positioning control, and software correction. Detailed discussion covers the following factors influencing the MC geometric accuracy and workpiece accuracy: (a) thermal displacements and their error compensation for spindle system, ball screws and machine tool column; (b) positioning errors and their compensation using displacement sensors; (c) deformations of the tool during the cutting process and the improvement of accuracy by adaptive control; (d) on-the-machine measurement accuracies of machined parts.

Newly developed methods for improving machining accuracy have been

proposed and by applying these methods to MCs, the validity of the proposed methods have been experimentally confirmed. From these results, the proposed techniques not only eliminate errors inherent in the structure of the MC but also those due to displacements caused by the external errors, that is workpiece-setting errors, tool-setting errors and so on, regardless of the effects due to the environmental conditions.

自動加工システムにおける加工精度の向上を目的として、自動化工作機械、工作物および工具を含めた加工誤差要因を明らかにし、工作機械の主要な構成要素である主軸系、送り系および構造系において生じる変位誤差と、加工位置で発生する位置誤差を対象とした精度補償技術について提案し、それらの有効性を明らかにした。また、切削加工時の変形による誤差およびオン・ザ・マシン計測による測定精度についても考察した。本論文の内容を要約すると次の通りである。

第1章“緒論”においては、自動加工システムの発展経緯とその実現に大きく寄与した新技術の開発の相乗効果を明らかにし、近年、生産工場の無人化の流れの中で一層重要視されるようになった精度補償技術の背景を説明し、本研究の工業的な意義およびその目的を明らかにした。

第2章“工作機械の変位誤差補正”においては、主軸系、送り系および構造系の誤差要因を明らかにし、これら位置誤差の自動補正法を提案し、その効果を確認した。すなわち、主軸系については主軸頭の熱膨張誤差から工具位置での誤差を自動補正する方法、そして主軸に冷却空気を吹きつけ主軸の温度を制御する方法について検討し、これらの効果を基礎的実験により確認した。

また送り系については、シングルアンカ方式で支持されたボールねじの熱膨張誤差の測定を行ない、ボールねじ支持軸受を起点とする直線補間近似を用いて、NCユーザマクロ機能により自動補正が可能であることを明らかにした。さらに構造系の変位誤差については、コラムの熱変形挙動の測定および有限要素法による解析を行い、熱剛性向上対策を提示するとともに、レーザ光の直線性を利用したコラムのそりの自動測定法およびカウンタヒーティングによる自動補正法を提示し、それらの有効性を明らかにした。

第3章“工作機械の位置誤差補正”においては、第2章でとりあげた工作機械構成要素の変位誤差に加えて、工作物・工具系の加工誤差要因も含めた加工位置での位置誤差を対象とした自動計測補正について検討した。この目的のために1軸変位量検出センサ、3軸変位量検出センサ、3軸位置検出センサ、3点式変位量検出センサおよび3次元変位量検出センサを試作し、これら変位センサの機能と性能についての評価を行なった。次いで、これらの変位センサを用いた自動計測補正法が加工精度の向上に有効であることを計測補正実験および切削加工実験により確認した。

第4章“適応制御技術による高精度化”では、小径ドリルでの超高速加工において、切削トルクの変化および工具折損を主軸回転数の低下から検出する方法を提案し、その有効性を確認した。また、この手法をステップフィード加工における送り速度の適応制御に応用した。次いで、形状寸法適応制御（GAC）の観点から、エンドミル加工時の送

り速度変動から切削負荷を一定に制御する方法を提案し、加工精度の向上に有効であることを示した。

第5章“加工精度のオン・ザ・マシン計測と加工誤差補正”においては、第3章で試作した自動計測用変位センサを用いて、位置・寸法および中ぐり穴径、さらには曲面形状のオン・ザ・マシン計測を行ない、提案したオン・ザ・マシン計測法が測定能率および測定精度の観点から、自動加工システムにおける計測の自動化に有効であることを明らかにした。

また加工誤差補正の対象として中ぐり穴径制御をとりあげ、中ぐり穴径の高精度測定法を提示するとともに、試作した刃先寸法自動補正機構を有する中ぐり棒による穴径制御を行ない、提案したシステム構成が有効であることを確認した。最後に、3次元変位量検出センサによるNC輪郭精度の評価法を提示し、工作機械の輪郭加工精度の向上に有効な手段であるとの結論を得た。

第6章“結論”においては、各章において得られた結論を総括するとともに、自動加工システムにおける高精度化対応技術に関する今後の問題点を指摘し、精度補償技術の基本的な考え方を提案した。

以上のように、本論文は自動加工システムにおける高精度化対応技術を体系化し、これに基づく精度補償技術あるいは高精度化対策を提案し、加工精度の向上について検討したものである。

なお、今後の課題としては、自動加工システムの中核となるマシニングセンタのより一層の高精度化を図る必要があり、これによって初めて自動加工システムとしての高度化・知能化が可能となる。このためには、自動加工機械としてのマシニングセンタの高精度化は当然であるが、これに計測系としての役割分担を行なわせ、加工系と計測系との有機的結合により高度の制御体系を築き上げることこそ、新しいCIMを目指した自動加工システムの必要条件と考えられる。

論文審査の結果の要旨

当該学位論文に関し、平成2年2月1日、第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について検討を加え、2月15日口頭発表の後第2回審査委員会を開催し、協議の結果以下の通りと判定した。なお、口頭発表における質疑を面接審査に代えることとした。

本論文は、自動加工システムにおける加工精度の向上をはかるために、工作機械、工作物および工具で構成される加工システムの各構成要素で生じる誤差要因を解明し、新しい精度補償技術と提案の有効性の評価を行ない、オン・ザ・マシン計測とその精度保持にまで拡張して論じたものである。

まず、工作機械に生ずる変位誤差補正では、主軸系の熱膨張にもとづく工具位置自動補正法、冷却空気吹き付けによる主軸の温度制御法などについて提案し、また、送り系の熱膨張の解析とその自動補正について有効性を評価した。さらにはコラムの熱変形の理論的および実験的な解明を行い、その結果、レーザ光によるコラムのそりの自動測定

法の開発やカウンタヒーティング法という従来の工作機械では考えられなかったユニークなその自動補正法を提案して、その有効性を明らかにした。

また、工作機械に生ずる位置誤差に関しては、工作物、工具を含めた系の加工位置での自動計測位置誤差補正を対象として検討した。ここでは、新しく用途に応じた自動計測変位センサを試作開発し、その機能評価を行なった。そして、これを用いた自動計測補正法の研究の結果、加工精度の向上に非常に有効であったとしている。

次いで、この自動計測変位センサにより、実用的な位置、寸法および中ぐり穴径、さらには曲面形状のオン・ザ・マシン計測を行なって、ここで提案したオン・ザ・マシン自動計測法が、測定の能率や精度の観点からみて、自動加工システムにおける計測の自動化に大きく寄与することを明らかにした。

以上の研究により本論文は博士論文に値するものであると判定する。